

УДК 62-83

**ИНТЕГРИРОВАННАЯ СИСТЕМА МНОГОКООРДИНАТНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ  
ДЛЯ СБОРОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ МИКРОЭЛЕКТРОНИКИ****канд. техн. наук, доц. И.В. ДАЙНЯК; Д.Г. БЕГУН; В.В. ПОЛЯКОВСКИЙ**  
**(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)**

*Рассматривается новый подход к построению сборочного оборудования микроэлектроники, согласно которому его система перемещений конфигурируется на многокоординатных приводах и механизмах параллельной кинематики. Управление разработанной системой осуществляется на основе разработанных алгоритмов, использующих цифровую информацию, получаемую от системы технического зрения. Для предложенного механизма параллельной кинематики приведено решение прямой и обратной задач кинематики на основе математических моделей описания его топологии и кинематики. Разработана программа, позволяющая проводить пошаговое моделирование и визуализацию положения и ориентации каретки механизма в соответствии с изменяющимися на каждом шаге входными переменными параметрами. Интегрированная система многокоординатных перемещений позволяет на новой элементной базе создавать перспективное сборочное оборудование микроэлектроники с высокими показателями назначения. Приведена схема встраивания разработанной системы перемещений в оборудование и достигаемые при этом характеристики точности, скорости и ускорения рабочей каретки.*

**Введение.** Интегрированная система многокоординатных перемещений конфигурируется как система перемещений на многокоординатных приводах и механизмах параллельной кинематики и является механо-аппаратно-программным комплексом, относящимся к классу мехатронных систем перемещений. Структурно ее можно разделить [1] на две составляющие: исполнительный механизм параллельной кинематики и многокоординатный привод, в котором управление всеми координатными двигателями происходит через специальный контроллер от программы верхнего уровня на управляющем компьютере.

Многокоординатный привод может быть построен как на параллельном сочетании некоторого количества однокоординатных управляемых двигателей по числу параллельных кинематических цепей, так и на использовании одного гибридного многокоординатного двигателя [2], замыкающего все обобщенные координаты используемого механизма параллельной кинематики. Безусловно, в прецизионных системах перемещений специального технологического сборочного оборудования, от которых требуется реализация технологических операций, связанных с перемещениями в трехмерном пространстве, предпочтительным является гибридный многокоординатный двигатель, позволяющий создавать интегрированный координатный привод и на его основе системы перемещений на механизмах параллельной кинематики с числом степеней свободы до шести включительно. Это научно-техническое направление в настоящее время очень востребовано, начинает интенсивно развиваться в разных научных и прикладных аспектах [3]. В отличие от традиционной системы многокоординатного привода, когда каждая координата представляет собой однокоординатный механо-аппаратный модуль движения со своим отдельным аппаратным интерфейсом, в разрабатываемых и используемых нами гибридных многокоординатных приводах их конструктивное исполнение, электромагнитная система и аппаратный интерфейс являются общими для всей конкретной системы перемещений. Ниже будет рассмотрена система перемещений такого типа, реализующая пространственное перемещение рабочей каретки с шестью степенями свободы.

**Система перемещений на сегментном многокоординатном приводе.** Разработанная многокоординатная система перемещений с шестью степенями свободы для сборочного технологического оборудования микроэлектроники представляет собой интегрированную систему, которая состоит из шестикоординатного исполнительного манипулятора с гибридной структурой (рис. 1), шести сегментных синхронных двигателей 1, 2, 3, 4, 5, 6 и шести параллельных кинематических цепей механизма параллельной кинематики, звенья которых через сферические шарниры передают управляемое движение на рабочую каретку 8. Исполнительные двигатели входят в состав координатных приводов  $S_1, S_2, \dots, S_6$ , согласованная работа которых обеспечивается управляющей программой контроллера в соответствии со структурной схемой, показанной на рисунке 1.

Контроль состояния объекта обработки, находящегося на подвижной каретке, осуществляется по результатам цифровой обработки информации от системы технического зрения (СТЗ). При этом в компьютере по разработанной программе совместно обрабатываются текущее состояние контроллера системы перемещений и результаты распознавания. В процессе выполнения технологической сборочной операции каретка с пластиной или кристаллом перемещается по трем линейным и трем угловым координатам в зависимости от команд, поступающих от контроллеров на силовые приводы. Команды в свою очередь формируются по результатам цифровой обработки информации, полученной от системы технического зрения. Как правило, в сборочном оборудовании телевизионный датчик СТЗ располагается рядом с

инструментом сборки. Это позволяет устанавливать и совмещать систему координат датчика и пространственную систему координат объекта, связанную с кареткой шестистепенного исполнительного манипулятора. Последний должен обеспечивать достаточную для распознавания ортогональность плоскости объекта и оптической оси датчика. Для управления разработанной шестикординатной системой перемещений нами предложена аппаратная конфигурация на основе двух контроллеров LSMC-х, созданных и серийно выпускаемых на предприятии «Рухсервомотор» [4].

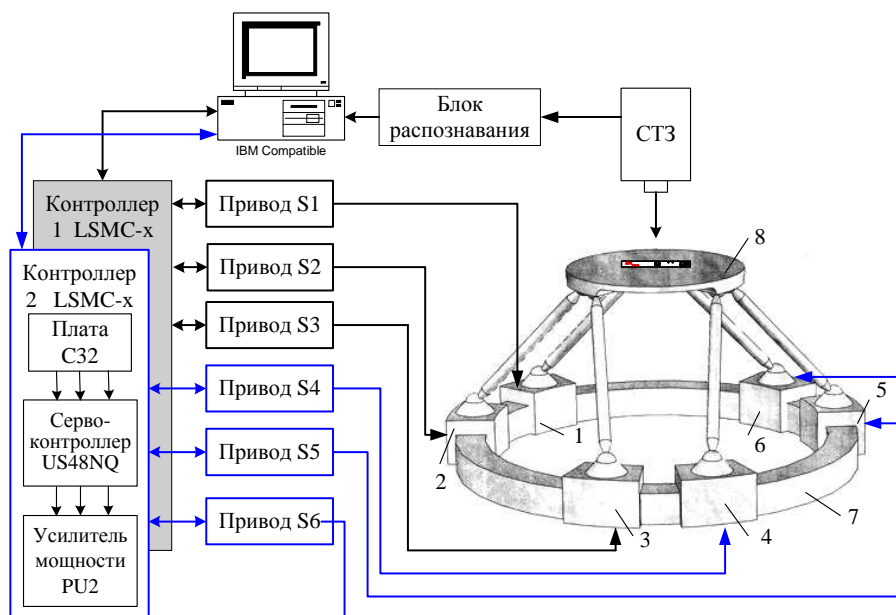


Рис. 1. Структура интегрированной системы многокоординатных перемещений:  
1–6 – сегментные модули движения; 7 – кольцевой статор; 8 – рабочая каретка

**Алгоритмизация математических моделей решения прямой и обратной задач кинематики для исполнительного манипулятора.** В основе алгоритмов управления исполнительным манипулятором интегрированной системы перемещений лежат аналитические зависимости, связывающие кинематические характеристики задаваемых движений на каждом подвижном сегменте многокоординатного двигателя с тремя линейными  $x, y, z$  и тремя угловыми  $\varphi, \theta, \psi$  обобщенными координатами перемещаемой каретки в трехмерном пространстве. Такие аналитические зависимости получают при решении прямой и обратной задач кинематики, для которых ранее [5] были предложены математические модели описания топологии и кинематики рассматриваемого манипулятора, обеспечивающие требуемое положение и ориентацию подвижной системы координат каретки по отношению к неподвижной системе координат статора гибридного синхронного двигателя. Как следует из принятой расчетной модели, взаимное положение этих систем координат зависит одновременно от всех кинематических связей и текущих обобщенных координат.

Разработанный алгоритм решения прямой задачи кинематики основывается на равенстве матрицы  $M_1$  текущего кинематического состояния исполнительного механизма, записываемой в виде

$$M_1 = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

матрице  $M_2$ , описывающей положение и ориентацию подвижной каретки:

$$M_2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cos \theta & -\sin \varphi \cos \psi + \cos \varphi \sin \theta \sin \psi & \sin \varphi \sin \psi + \cos \varphi \sin \theta \cos \psi & x_0 \\ \sin \varphi \cos \theta & \cos \varphi \cos \psi + \sin \varphi \sin \theta \sin \psi & -\cos \varphi \sin \psi + \sin \varphi \sin \theta \cos \psi & y_0 \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где  $a_{ij}$  ( $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3$ ) – элементы матрицы, рассчитываемые по значениям обобщенных координат привода и конструктивным параметрам механизма, которые определяются по формулам, полученным в

работе [6];  $\varphi, \theta, \psi, x_0, y_0, z_0$  – угловые и линейные независимые координаты, задающие положение и ориентацию рабочей каретки в трехмерном пространстве.

На основании условия равенства матриц  $M_1$  и  $M_2$  получены в явном виде формулы решения прямой задачи, состоящей в расчете текущих линейных ( $x_0, y_0, z_0$ ) и угловых ( $\varphi, \theta, \psi$ ) координат рабочей каретки в системе координат статора в виде

$$\begin{aligned} x_0 = a_{14}; \quad y_0 = a_{24}; \quad z_0 = a_{34}; \quad \sin \varphi = \frac{a_{21}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}; \quad \cos \varphi = \frac{a_{11}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}; \\ \sin \theta = -a_{31}; \quad \cos \theta = \sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}; \quad \sin \psi = \frac{a_{32}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}; \quad \cos \psi = \frac{a_{33}}{\sqrt{a_{11}^2 + a_{21}^2}}. \end{aligned} \quad (3)$$

Нетрудно видеть, что формулы (3) обеспечивают однозначный алгоритм решения прямой задачи кинематики и полностью соответствуют требованиям реализованной системы управления.

Для решения обратной задачи кинематики методами аналитической геометрии нами получены формулы расчета координат положения подвижных сегментов 1, 2, ..., 6 в зависимости от текущего положения каретки, задаваемого координатами точек  $C_1, C_2, C_3$  (рис. 2).

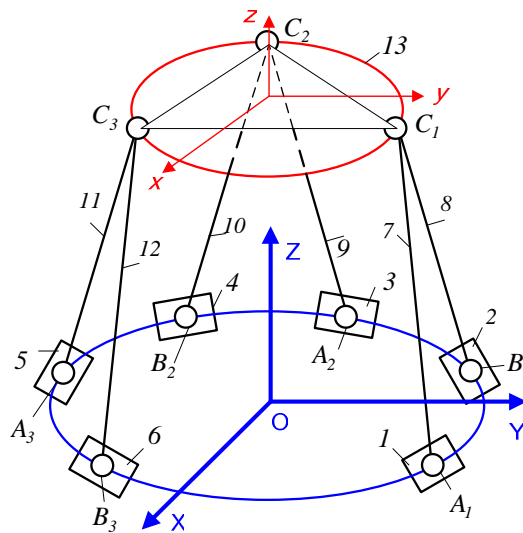


Рис. 2. Расчетная структурно-кинематическая схема исполнительного манипулятора:  
1, 2, 3, 4, 5, 6 – сегменты двигателя; 7, 8, 9, 10, 11, 12 – подвижные звенья  
кинематических цепей; 13 – рабочая каретка

Так, например, для точек  $A_1(x_1, y_1)$  и  $B_1(x_2, y_2)$  формулы расчета соответствующих координат имеют вид

$$x_{1,2} = \frac{b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2ac}; \quad y_{1,2} = \pm \sqrt{R^2 - x_{1,2}^2}, \quad (4)$$

где  $a, b, c$  – параметры, рассчитываемые по формулам:

$$a = 4 \left( \left( x^{(C_1)} \right)^2 + \left( y^{(C_1)} \right)^2 \right); \quad b = 2Ax^{(C_1)}; \quad c = A^2 - 4 \left( y^{(C_1)} \right)^2 R^2, \quad (5)$$

где  $x^{(C_1)}, y^{(C_1)}$  – координаты точки  $C_1$  в неподвижной системе координат;  $A, R$  – конструктивные параметры механизма.

Координаты точек  $A_2, B_2$  и  $A_3, B_3$  определяются по формулам, аналогичным (4) и (5). При выборе решения учитываются условия бесколлизийной работы подвижных элементов манипулятора.

Для моделирования прямой и обратной задачи кинематики рассматриваемого исполнительного манипулятора в среде MATLAB разработана программа интерактивной визуализации, интерфейс которой представлен на рисунке 3.

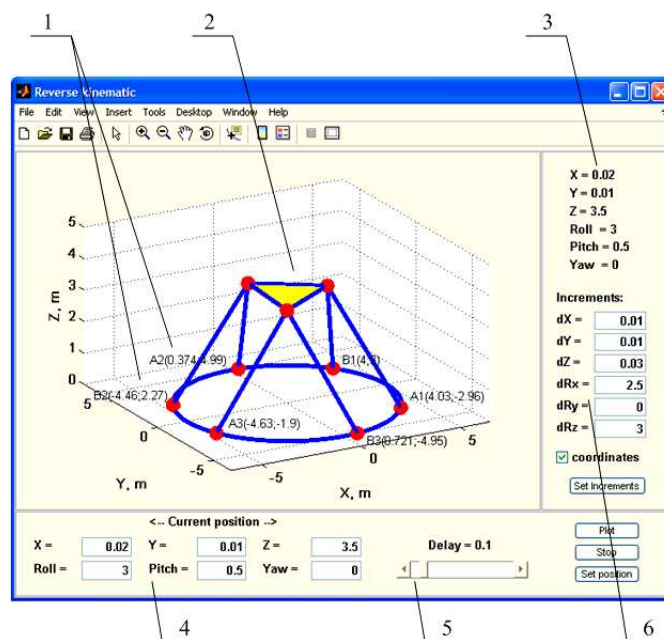


Рис. 3. Интерфейс программы моделирования решения прямой и обратной задач кинематики:  
 1 – текущие координаты (x, y) подвижных сегментов привода; 2 – текущее состояние пространственного механизма;  
 3 – текущие координаты положения и ориентации каретки; 4 – задаваемые координаты положения и ориентации каретки;  
 5 – задержка пошаговой визуализации; 6 – задаваемые инкрементные приращения по координатам положения и ориентации каретки

Разработанная программа позволяет проводить пошаговое моделирование и визуализацию положения и ориентации каретки механизма в соответствии с изменяющимися на каждом шаге входными переменными параметрами. По результатам моделирования исполнительного манипулятора системы перемещений в части рабочей области с координатной калибровкой по точности и скорости получены следующие ее выходные характеристики: диапазон перемещений по координатам  $x$  и  $y$  от 0 до  $\pm 120$  мм, по  $z$  от 0 до  $\pm 80$  мм; точность по линейным координатам  $x$ ,  $y$ ,  $z$  составляет  $\pm 0,1 \dots \pm 0,3$  мкм; точность по угловым координатам  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$  составляет  $\pm 20 \dots \pm 30$  угл. с; скорость по линейным координатам – до 2 м/с, ускорение – до 5 м/с<sup>2</sup>.

**Встраивание интегрированной системы перемещений в сборочное оборудование.** Разработанная интегрированная система многокоординатных перемещений позволяет на совершенно новой элементной базе создавать перспективное специальное технологическое сборочное оборудование микроэлектроники со значительно более высокими показателями назначения, такими как точность и производительность. Проведенные теоретические исследования и результаты компьютерного моделирования точности и рабочих областей исполнительного манипулятора показали, что предложенная система перемещений по точности и быстродействию не менее чем в 2...3 раза превосходит существующие. Система перемещений, разработанная как мехатронный узел со своим аппаратно-программным интерфейсом, может быть легко встроена в любое сборочное оборудование взамен координатных систем на ЛШД. Укрупненная схема встраивания в сборочное оборудование показана на рисунке 4.

Характеристики диапазона перемещений, точности, скорости, ускорения разработанной системы перемещений приведены в таблице.

Характеристики интегрированной системы перемещений

Ось	Диапазон, мм	Точность, мкм	Скорость, м/с	Ускорение, м/с <sup>2</sup>
X	$\pm 100$	0,3...0,5	1...2	20...50
Y	$\pm 100$	0,3...0,5	1...2	20...50
Z	$\pm 150$	0,1...0,2	0,5...1,0	10...20
Ось	Диапазон, град	Точность, с	Скорость, град/с	Ускорение, град/с <sup>2</sup>
$\varphi$	$\pm 360$	1...2	500...1000	10 000...30 000
$\theta$	$\pm 20$	0,1...0,2	400...800	5 000...10 000
$\psi$	$\pm 20$	0,1...0,2	400...800	5 000...10 000

Представленные характеристики (см. таблицу) полностью удовлетворяют не только текущим, но и перспективным требованиям к системам координатных перемещений сборочного и отдельных видов оптико-механического оборудования. Достигаемые показатели точности выше, чем у аналогов, обеспечиваются за счет кинематической редукции в самом механизме параллельной кинематики, при этом скорости перемещений каретки редуцируются с обратным коэффициентом. Таким образом, при прочих равных условиях скорости перемещения по координатам могут быть выше в 2 раза, чем непосредственные скорости подвижных сегментов многокоординатного привода.

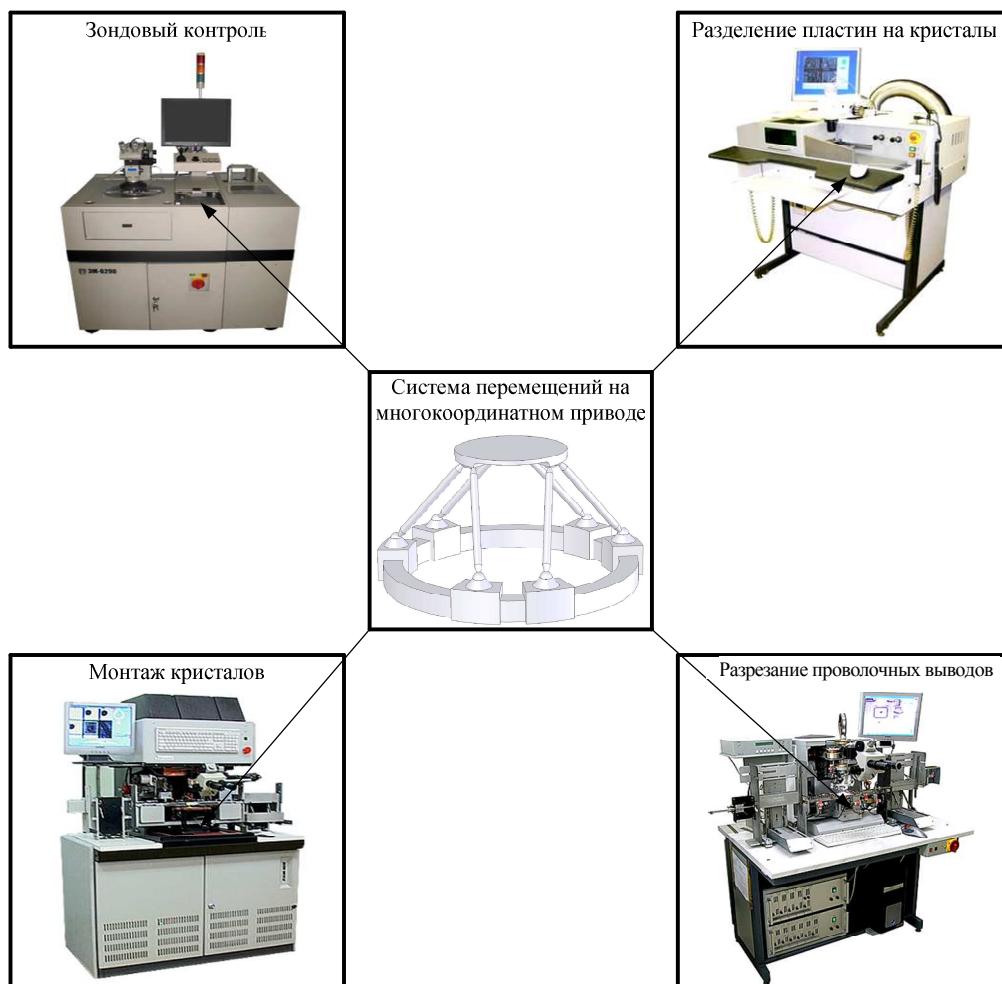


Рис. 4. Схема встраивания системы перемещений на многокоординатном приводе в сборочное оборудование

Интегрированная система многокоординатных перемещений на кольцевом сегментном приводе может быть также использована в проекционных системах фотолитографического оборудования для перемещения оправок с линзами. В конструкцию проекционной системы может быть встроен механизм стабилизации координат позиционирования оптических элементов, позволяющий подстраивать их при сборке и изменении геометрии проекционной системы и оптических элементов вследствие старения. В результате специальные адаптивные механизмы позиционирования позволят поддерживать на требуемом уровне показатели назначения. При этом для каждого подстраиваемого оптического элемента адаптивный механизм позиционирования предлагается делать на основе исполнительных механизмов с шестью или меньшим числом степеней свободы кольцевого типа с сегментными электромагнитными модулями.

**Заключение.** В результате проведенного исследования предложена интегрированная система многокоординатных перемещений, основанная на гибридной компоновке исполнительного механизма манипулятора и сегментного привода прямого действия, подвижные элементы которого кинематически связаны с подвижной кареткой, обеспечивая возможность управления ее движением с шестью степенями свободы.

Для разработанного механизма аналитические алгоритмы решения прямой и обратной задач кинематики, полученные в явном виде при алгоритмизации математических моделей, позволяют в режиме

реального времени проводить компьютерное моделирование в среде MATLAB с интерактивной визуализацией самого механизма и отображением всех кинематических характеристик.

Алгоритмы и программное обеспечение для исполнительного механизма могут быть рекомендованы для компьютерного формирования рабочей области с требуемыми свойствами по кинематическим и точностным показателям при встраивании системы перемещений в конкретное оборудование для производства изделий микроэлектроники.

Предложенная интегрированная система перемещений на кольцевом сегментном приводе и механизме параллельной кинематики предназначена для использования в качестве базового кинематического узла при разработке как прецизионного сборочного и оптико-механического оборудования микроэлектроники, так и прецизионных станков сложной механообработки и лазерной обработки материалов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мехатроника / Т. Исии [и др.]. – М.: Мир, 1988. – 318 с.
2. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования: моногр. / В.В. Жарский [и др.]; под ред. д-ра техн. наук, проф. С.Е. Карповича. – Минск: Бестпринт, 2013. – 208 с.
3. Лукьянец, С.В. Моделирование гибких производственных систем и роботизированных комплексов: моногр. / С.В. Лукьянец, А.П. Пашкевич. – Минск: БГУИР, 2005. – 232 с.
4. Жарский, В.В. Системы прямого привода «Рухсервомотор» / В.В. Жарский // Оборудование: рынок, предложение, цены: промышленный журнал. – 2006. – № 02(110). – С. 90–97.
5. Литвинов, Е.А. Компьютерное моделирование прямой и обратной задачи кинематики пространственной системы перемещений с шестью степенями свободы в среде MATLAB/Simulink / Е.А. Литвинов, С.Е. Карпович, В.В. Жарский // Теоретическая и прикладная механика. – 2008. – Вып. 23. – С. 112–117.
6. Моделирование механизмов параллельной кинематики в среде MATLAB/Simulink: моногр. / С.Е. Карпович [и др.]. – Минск: Бестпринт, 2013. – 153 с.

Поступила 18.04.2014

#### INTEGRATED SYSTEM OF MULTICOORDINATE MOVEMENTS FOR ASSEMBLY EQUIPMENT OF MICROELECTRONICS

**I. DAINIAK, D. BEGUN, V. POLIAKOVSKI**

*The article is devoted to a new approach of construction of assembly equipment for microelectronics; according to this approach the motion system of assembly equipment is configured on multicoordinate drives and parallel kinematics mechanisms. The control of motion system is based on developed algorithms, which use the digital information from vision system. The solution of direct and inverse kinematics problem of the offered parallel kinematics mechanism is given; it is based on mathematical models, which describe its topology and kinematics. The program which allows performing the step simulation and visualization of position and orientation of mechanism carriage in accordance with the changing on each step input variable parameters was developed. The integrated system of multicoordinate movements allows creating perspective assembly equipment for microelectronics with high target characteristics on new element base. The scheme of the embedding of developed motion system into equipment was given, and achieved characteristics of accuracy, velocity and acceleration were shown.*